

УДК 621.55.30

DOI: 10.22213/2413-1172-2022-2-34-39

## Кинематика 5R-механизма Беннетта, отрицательная угловая скорость

**Т. А. Мустафаев**, аспирант, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева (КАИ), Казань, Республика Татарстан, Россия

**Ф. Ф. Хабибуллин**, кандидат технических наук, доцент, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева (КАИ), Казань, Республика Татарстан, Россия

**М. Р. Фаизов**, аспирант, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева (КАИ), Казань, Республика Татарстан, Россия

*Проводится исследование пространственных механизмов методом тригонометрических формул. Описывается создание первого простого механизма Беннетта, полученного через пирамиду его основания и сторон. В пирамиде определяются углы наклона и высоты сторон для получения стандартных равенств. Благодаря всем параметрам определяются теоретические длины звеньев, имеющие практические значения. Все параметры длин и углов представляются на структурной схеме для каждого полученного механизма. На основе двух одинаковых, но зеркально расположенных механизмов синтезируется пятизвенный механизм Беннетта. Пятизвенный механизм получен при помощи взаимной интеграции 4 идентичных звеньев, для которых описываются методы расчета. В статье присутствует расчет определения длины и угла станины. Станина получается путем заданных параметров пространственного угла движения звеньев, параметров двух зеркальных звеньев, выведенных в одно выражение. Используется заданное неравенство для пятизвенного механизма, в котором получается ведущее и ведомое звено, совершающие полный оборот вокруг своей оси, с возможностью не соприкоснуться друг с другом. В данном исследовании все параметры механизма калибруются интуитивно. Определяются основные кинематические параметры механизма – угловое перемещение, угловая скорость и угловое ускорение. Кинематика определяется относительно ведущего звена с учетом получения результата углового перемещения, скорости и ускорения ведомого звена. Для более точного расчета рассматривается зависимость дополнительного пространственного угла движения механизма в кинематических параметрах. Полученные данные визуализируются при помощи графиков в зависимости от вращения входного звена к выходному с помощью приложения Maple. В тригонометрических функциях присутствует отрицательное и положительное значение, определяемое квадрантами по секторам окружности. Графики углового перемещения и угловой скорости по расчетам демонстрируют отрицательные числовые значения. Угловое ускорение ведомого звена во время вращения полного оборота ведущего звена механизма меняет свое ускорение 4 раза.*

*Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что ведомое звено будет вращаться рывками, в данных моментах присутствует возможность разрушения механизма, повышения нагрузки на ведомое звено и дисбаланса механизма.*

**Ключевые слова:** пятизвенный механизм Беннетта, пространственный угол движения, двойной кривошип, ведущий кривошип, ведомый кривошип.

### Введение

Современным авторам интересны научные исследования в области науки и техники. Особое внимание исследователи уделяют моделированию научных результатов.

За последние годы ученые стремятся объединить теоретические аспекты исследований нескольких направлений в одну общую концепцию. Наиболее актуальная область исследования сегодня – это пространственные механизмы.

Многие из авторов стремятся создать собственную уникальную модель для дальнейшего серийного изготовления, чтобы расширить базу существующих пространственных механизмов.

В данной работе рассмотрен синтез популярных четырехзвенных механизмов Беннетта.

В работе решена задача синтеза пятизвенного механизма, использующая существующие методы, применяемые для синтеза четырехзвенных механизмов Беннетта.

**Цель исследования** – разработка методов геометрического синтеза и кинематического анализа пространственного 5R-механизма и его теоретическое исследование. Зависимость движения ведущего звена к ведомому звену.

### Основы геометрического синтеза четырехзвенного механизма

Рассмотрим связь пирамиды и четырехзвенного механизма Беннетта, который представлен на рисунке 1 [1–3].

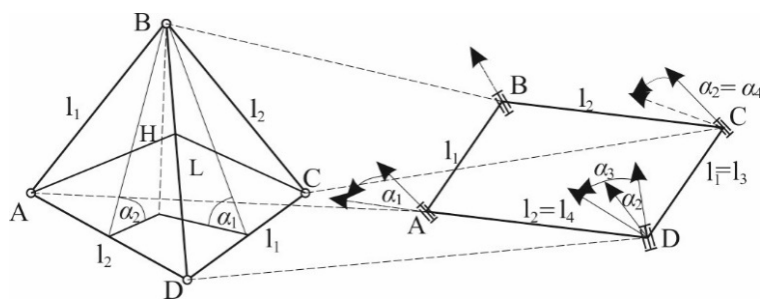


Рис. 1. Образование механизма

Fig. 1. Mechanism formation

В основе закладываются параметры, где  $\alpha_1 = \alpha_3 = 75^\circ$ ,  $\alpha_4 = \alpha_2 = 60^\circ$ , далее, для реализации пространственного механизма,  $l_1 = l_3$  и  $l_2 = l_4$ . Основным условием реализации механизма в пространстве является следующее равенство:

$$\frac{l_1}{\sin \alpha_1} = \frac{l_2}{\sin \alpha_2}; \quad (1)$$

$$h'' = \frac{2K}{l_2};$$

$$H = h'' \sin \alpha_2 = \frac{1}{l_2} 2K \sin \alpha_2;$$

$$h'' = \frac{2K}{l_1},$$

где  $K$  – площадь каждого треугольника из сторон пирамиды;  $H$  – опущенная высота из вершины пирамиды;  $h$  – перпендикуляр основания пирамиды.

Полученный четырехзвенный механизм имеет следующие параметры для реализации рабочего пятизвенного механизма [4, 5]. Далее применим параметры  $l_1 = 90$  мм,  $l_2 = 80,7$  мм, из чего следует вывод, что все вышеуказанные звенья равны сторонам механизма (см. рис. 1).

### Геометрический синтез пятизвенного механизма

Смоделированный и описанный выше четырехзвенный механизм с рабочими параметрами соединяем с идентичным механизмом, но таким образом, чтобы звенья совпадали [6, 7]. Тогда, объединив станины и отбросив соответствующие по размеру звенья, получаем новый уникальный пятизвенный механизм [8, 9]. При создании использовались данные четырехзвенного механизма, но с новыми параметрами пятизвенного [10, 11]. Применяются абсолютно другие равен-

ства и выражения [12–14]. Заданные углы звеньев механизма составляют  $\alpha_1 = \alpha_3 = 75^\circ$ ,  $\alpha_4 = 60^\circ$ ,  $\alpha_5 = 120^\circ$  при учете условий возможности реализации механизма с пятью звеньями, где  $\alpha_5 > \alpha_1 > \alpha_4$  и два кривошипа с углом  $\beta_1 = 0$ . Звенья 1 и 3 будут всегда равны друг другу. Основное базовое условие реализации пятизвенного механизма

$$\frac{l_1}{\sin \alpha_1} = \frac{l_4}{\sin \alpha_4} = \frac{l_5}{\sin \alpha_5}. \quad (2)$$

Так как по нашим условия самый важный элемент – это угол  $\beta_1$ , то параметры звена 2  $\alpha_2$  и  $l_2$  из созданных четырехзвенных механизмов Беннетта. Звено 2 и его параметры зависят от параметров звеньев 5 и 4 и определяются по следующим выражениям:

$$\alpha_2 = \alpha_5 - \alpha_4 = 60^\circ; \quad (3)$$

$$l_2 = l_5 - l_4. \quad (4)$$

Пространственная высота звеньев 4 и 5 определена как  $h_2 = h_3 = 0$ . В данном случае параметр  $l_5 = 80,7$  мм. Другие параметры описаны выше.

### Кинематический анализ механизма

Представим структурную схему пятизвенного механизма Беннетта (рис. 2).

Механизм пронумерован, и на нем изображены все углы [15–17]. Структурная схема позволяет ориентироваться по формулам расчетов перемещения, скорости и ускорения [18, 19].

Уравнение углового перемещения звена 4:

$$\psi_4 = \gamma_1 + \gamma_2 - 180^\circ = \arcsin \frac{c_1 \sin \varphi_1}{a_1 - b_1 \cos \varphi_1} + \arcsin \frac{c_2 \sin(\varphi_1 + \beta_1)}{a_2 - b_2 \cos(\varphi_1 + \beta_1)} - 180^\circ, \quad (5)$$

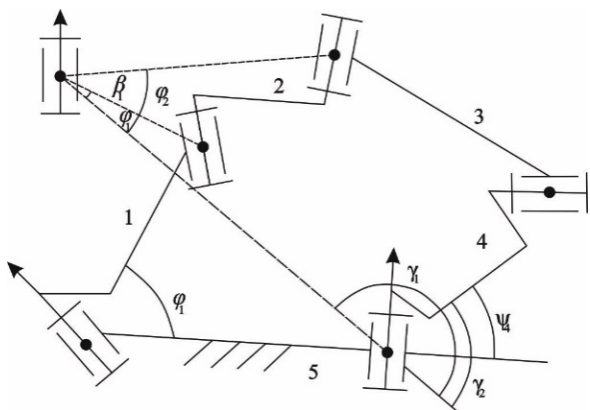


Рис. 2. Структурная схема пятизвенного механизма Беннетта

Fig. 2. Structural diagram of the five-bar Bennett mechanism

Для удобства работы с формулами вводятся буквенные выражения, содержащие тригонометрию, включающие и поясняющие образования параметров звеньев, где

$$a_1 = 1 - \cos \alpha_1 \cos \alpha_5, \quad b_1 = \sin \alpha_1 \sin \alpha_5, \\ c_1 = \cos \alpha_5 - \cos \alpha_1;$$

$$a_2 = 1 - \cos \alpha_1 \cos \alpha_4, \quad b_2 = \sin \alpha_1 \sin \alpha_4, \\ c_2 = \cos \alpha_1 - \cos \alpha_4.$$

$$\Psi_4 = -\arcsin \frac{b_2 c_1 \sin \varphi_1 + \frac{1}{2}(a_1 c_1 - a_2 c_1) \sin(2\varphi_1 + \beta_1) - b_1 c_2 \sin(\varphi_1 + \beta_1) + \frac{1}{2}(a_1 a_2 + a_2 c_1) \sin \beta_1}{a_1 a_2 + \frac{1}{2} b_1 b_2 [\cos(2\varphi_1 + \beta_1) + \cos \beta_1] - a_1 b_2 \cos(\varphi_1 + \beta_1) - a_2 b_1 \cos \varphi_1}, \quad (6)$$

а результат углового перемещения звена 4 можно видеть на рисунке 4.

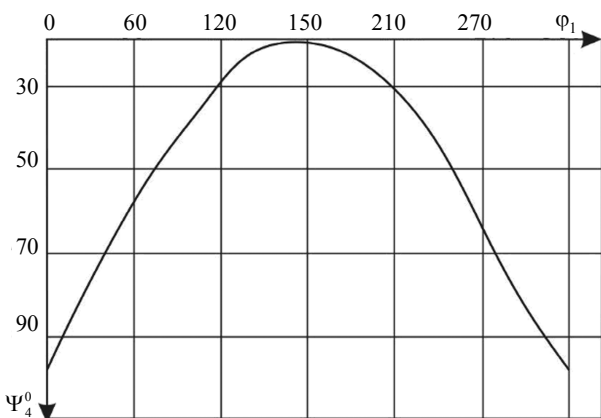


Рис. 4. График углового перемещения, тип 2

Fig. 4. Angular movement graph, type 2

Угловая скорость ведомого звена 4 решается в виде следующей формулы:

С условием использования тригонометрии определяется направление угловой скорости:

$$c_1 < 0, \quad c_2 < 0.$$

Уравнение углового перемещения звена 4 было выражено через угловое перемещение звена 1 (рис. 3).

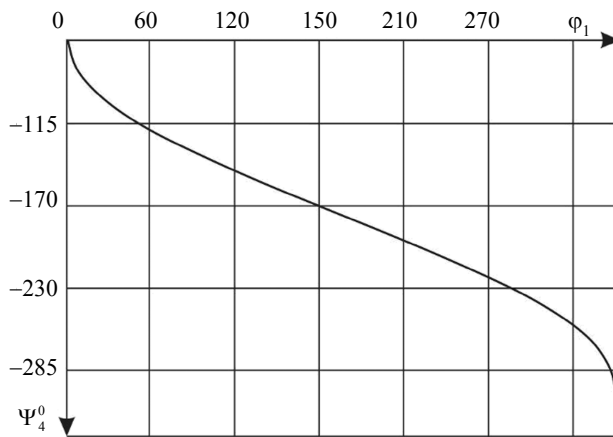


Рис. 3. График углового перемещения

Fig. 3. Angular movement graph

Для выражения значения угла движения звена 4 необходимо использовать выражение

$$\omega_4 = \left[ \frac{c_1}{a_1 - b_1 \cos \varphi_1} + \frac{c_2}{a_2 - b_2 \cos(\varphi_1 + \beta_1)} \right] \omega_1, \quad (7)$$

а результат угловой скорости звена 4 можно видеть на рисунке 5.

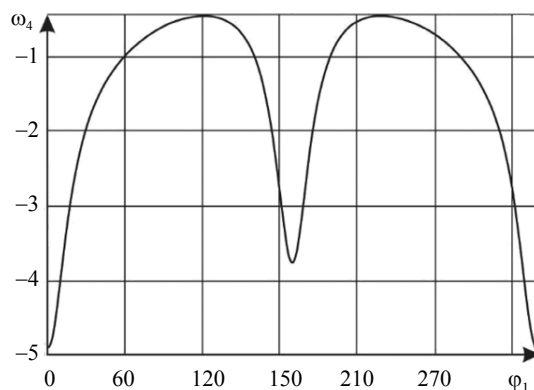


Рис. 5. График угловой скорости ведомого кривошипа

Fig. 5. Plot of the angular velocity of the driven crank

Угловое ускорение ведомого звена 4 определяется выражением

$$\varepsilon_4 = \left\{ \frac{b_1 c_1 \sin \varphi_1}{(a_1 - b_1 \cos \varphi_1)^2} + \frac{b_2 c_2 \sin(\varphi_1 + \beta_1)}{[a_2 - b_2 \cos(\varphi_1 + \beta_1)]^2} \right\} \omega_1^2, \quad (8)$$

а результат скорости можно наблюдать на рисунке 6 [20].

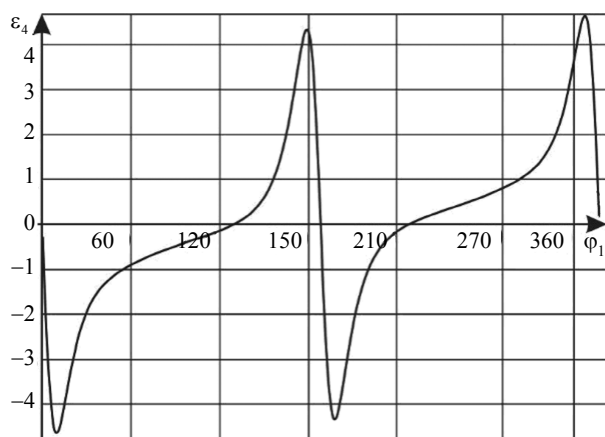


Рис. 6. Угловое ускорение звена 4

Fig. 6. Angular acceleration link 4

### Выводы

В ходе изучения пространственных механизмов с вращательными парами, а именно механизма Беннетта, проведен синтез и анализ, который реализован пятизвенным механизмом. Основные параметры использованы для реализации модели Беннетта на основе 5R. Проведено исследование кинематики механизма, после чего можно утверждать, что полученные выражения могут определять положение ведомого звена в зависимости от положения ведущего.

За основу выбран механизм с заданными звеньями, принимающими отрицательные условия работоспособности. Получено два графика углового перемещения. Угловая скорость данного механизма на графиках является отрицательной только по причине условия работоспособности и описанной модели.

### Библиографические ссылки

1. Кесель Л. Г. Влияние деформации плоского зеркала коаксиального лазера на характеристики выходного излучения // Вестник Казанского технического университета им. А. Н. Туполева. 2021. Т. 77, № 1. С. 15–20.

2. Батищева К. А., Вымпина Ю. Н. Влияние способа обработки алюминиево-магниевого сплава на структуру кольцевых осадков, формирующихся при испарении капель коллоидных растворов // Вестник Казанского технического университета им. А. Н. Туполева. 2021. Т. 77, № 1. С. 31–33.

3. Ефремова Е. С., Мифтахов Б. И., Солдаткина К. В. Имитационное моделирование неподвижного приемника вихревой системы воздушных сигналов // Вестник Казанского технического университета им. А. Н. Туполева. 2021. Т. 77, № 1. С. 102–108.

4. Иванов В. К. К задаче аналитического проектирования мехатронных систем // Вестник Казанского технического университета им. А. Н. Туполева. 2021. Т. 77, № 1. С. 67–70.

5. Валиуллина Д. М., Козлов В. К., Садыков Э. М. Исследование корреляций между характеристиками трансформаторного масла // Вестник Казанского технического университета им. А. Н. Туполева. 2021. Т. 77, № 1. С. 62–66.

6. Валиев А. И., Курьлев Д. В. Экспериментальная установка для исследования процесса электрохимической обработки кромок профиля пера лопаток газотурбинного двигателя // Вестник Казанского технического университета им. А. Н. Туполева. 2021. Т. 77, № 1. С. 57–61.

7. Кесель Б. А., Кесель Л. Г. Энергоэффективность мобильной газотурбинной электростанции малой мощности для электроснабжения буровой // Вестник казанского технического университета им. А. Н. Туполева. 2021. Т. 77, № 1. С. 71–75.

8. Муратаев Ф. И., Евлампьев А. В., Муратаев Т. А. Анализ причин развития стресс коррозии аустенитных сталей и сварных соединений // Вестник казанского технического университета им. А. Н. Туполева. 2021. Т. 77, № 1. С. 76–81.

9. Физическое моделирование теплогидравлических характеристик каналов с овально-траншейными вихрегенераторами / А. А. Миронов, С. А. Исаев, А. Н. Скрыпник, И. А. Попов, Ю. Ф. Гортышев // Тепловые процессы в технике. 2020. Т. 12, № 9. С. 386–402.

10. Фаизов М. Р., Мудров А. П. Исследование движения сферического тренажера // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26, № 1. С. 182–191.

11. Skrypnik A.N., Shchelchikov A.V., Gortyshov Yu.F., Popov I.A. Artificial neural networks application on friction factor and heat transfer coefficients prediction in tubes with inner helical-finning. *Applied Thermal Engineering*, 2022, vol. 206, p. 118049.

12. Роцин В. В., Хабибуллин Ф. Ф., Ерахмадов С. Н. К оценке температурного состояния шарикоподшипников опор гтд повышенной теплонапряженности // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. 2019. Т. 75, № 3. С. 66–69.

13. Моделирование динамики двухфазного потока в сепараторе / И. М. Баянов, Ю. Ф. Гортышев, В. Г. Тонконог, М. И. Тонконог // Вестник Казанского

го государственного технического университета им. А. Н. Туполева. 2013. № 4. С. 34–42.

14. Lustin A.D., Egorov S.V. Defining relation of vibration of vehicle suspension with the mass and rigidity design deviations. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2015, vol. 10, no. 24, pp. 44629-44635.

15. Мудров П. Г. Пространственные механизмы с вращательными парами / Казанский сельскохозяйственный институт имени М. Горького, 1976.

16. Конструктивное моделирование процессов синтеза : монография В. А. Райхлин, И. С. Вершинин, Р. К. Классен, Р. Ф. Гибадуллин, С. В. Пыстогов. Казань : ФЭн, 2020. 248 с.

17. Вершинин И. С. Конструктивное моделирование систем ассоциативной стеганографии // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. 2020. Т. 12-3. С. 137–144.

18. Snegurenko A.P., Zaydullin S.S., Novikova S.V., Valitova N.L., Kremleva E.S. Technology of multilevel interuniversity indicators as a factor for increasing academic mobility. Experience based on russian federal educational standards. *Integration of Education*, 2022, vol. 26, no. 1 (106), pp. 55-71.

19. Ассоциативная стеганография текстовых сообщений / И. С. Вешинин, Р. Ф. Гибадуллин, С. В. Пыстогов, В. А. Райхлин // Вестник московского университета. Серия 15: Вычислительная математика и кибернетика. 2021. № 1. С. 3–14.

20. Gibadullin R.F., Vershinin I.S., Volkova M.M. Software Development for Placing Tiles in Two-Dimensional Space. International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies - 2020 (FarEastCon 2020), p. 9271369.

## References

1. Kesel L.G. [Influence of deformation of a flat mirror of a coaxial laser on the characteristics of the output radiation]. *Vestnik Kazanskogo tehniceskogo universiteta im. A. N. Tupoleva*, 2021, vol. 77, no. 1, pp. 15-20 (in Russ.).

2. Batishcheva K.A., Vympina Yu.N. [Influence of the processing method of aluminum-magnesium alloy on the structure of ring deposits formed during the evaporation of droplets of colloidal solutions]. *Vestnik Kazanskogo tehniceskogo universiteta im. A. N. Tupoleva*, 2021, vol. 77, no. 1, pp. 31-33 (in Russ.).

3. Efremova E.S., Miftakhov B.I., Soldatkina K.V. [Simulation modeling of a fixed receiver of a vortex system of air signals]. *Vestnik Kazanskogo tehniceskogo universiteta im. A. N. Tupoleva*, 2021, vol. 77, no. 1, pp. 102-108 (in Russ.).

4. Ivanov V. K. [On the problem of analytical design of mechatronic systems]. *Vestnik Kazanskogo tehniceskogo universiteta im. A. N. Tupoleva*, 2021, vol. 77, no. 1, pp. 67-70 (in Russ.).

5. Valiullina D.M., Kozlov V.K., Sadykov E.M. [Study of correlations between the characteristics of transformer oil]. *Vestnik Kazanskogo tehniceskogo*

*universiteta im. A. N. Tupoleva*, 2021, vol. 77, no. 1, pp. 62-66 (in Russ.).

6. Valiev A.I., Kurylev D.V. [Experimental installation for the study of the process of electrochemical processing of the edges of the profile of the airfoil blades of a gas turbine engine]. *Vestnik Kazanskogo tehniceskogo universiteta im. A. N. Tupoleva*, 2021, vol. 77, no. 1, pp. 57-61 (in Russ.).

7. Kesel B.A., Kesel L.G. [Energy efficiency of a low-power mobile gas turbine power plant for drilling power supply]. *Vestnik Kazanskogo tehniceskogo universiteta im. A. N. Tupoleva*, 2021, vol. 77, no. 1, pp. 71-75 (in Russ.).

8. Murataev F.I., Evlampiev A.V., Murataev T.A. [Analysis of the reasons for the development of stress corrosion of austenitic steels and welded joints]. *Vestnik Kazanskogo tehniceskogo universiteta im. A. N. Tupoleva*, 2021, vol. 77, no. 1, pp. 76-81 (in Russ.).

9. Mironov A.A., Isaev S.A., Skrypnik A.N., Popov I.A., Gortyshev Yu.F. [Physical modeling of thermal-hydraulic characteristics of channels with oval-trench vortex generators]. *Teplovye processy v tehnike*, 2020, vol. 12, no. 9, pp. 386-402 (in Russ.).

10. Faizov M.R., Mudrov A.P. [Study of the movement of a spherical simulator]. *Vestnik Moskovskogo aviacionnogo institute*, 2019, vol. 26, no. 1, pp. 182-191 (in Russ.).

11. Skrypnik A.N., Shchelchikov A.V., Gortyshev Yu.F., Popov I.A. Artificial neural networks application on friction factor and heat transfer coefficients prediction in tubes with inner helical-finning. *Applied Thermal Engineering*, 2022, vol. 206, p. 118049.

12. Roshchin V.V., Khabibullin F.F., Erakhmadov S.N. [On the assessment of the temperature state of ball bearings of gas turbine engine supports with increased heat stress]. *Vestnik Kazanskogo tehniceskogo universiteta im. A. N. Tupoleva*, 2019, vol. 75, no. 3, pp. 66-69 (in Russ.).

13. Bayanov I.M., Gortyshev Yu.F., Tonkonog V.G., Tonkonog M.I. [Modeling the dynamics of a two-phase flow in a separator]. *Vestnik Kazanskogo tehniceskogo universiteta im. A. N. Tupoleva*, 2013, no. 4, pp. 34-42 (in Russ.).

14. Lustin A.D., Egorov S.V. Defining relation of vibration of vehicle suspension with the mass and rigidity design deviations. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2015, vol. 10, no. 24, pp. 44629-44635.

15. Mudrov P.G. *Prostranstvennyye mehanizmy s vrashhatel'nyimi* [Spatial mechanisms with rotational pairs]. Kazan Agricultural Institute named after M. Gorky, 1976 (in Russ.).

16. Raikhlin V.A., Vershinin I.S., Klassen R.K., Gibadullin R.F., Pystogov S.V. *Konstruktivnoye modelirovaniye processov sinteza* [Constructive modeling of synthesis processes]. Kazan, Fjen Publ., 2020 (in Russ.).

17. Vershinin I.S. [Constructive modeling of systems of associative steganography]. *Matematicheskie metody v tehnike i tehnologijah - MMTT*, 2020, vol. 12-3, pp. 137-144 (in Russ.).

18. Snegurenko A.P., Zaydullin S.S., Novikova S.V., Valitova N.L., Kremleva E.S. Technology of multilevel interuniversity indicators as a factor for increasing academic mobility. Experience based on russian federal educational standards. *Integration of Education*, 2022, vol. 26, no. 1 (106), pp. 55-71.

19. Veshinin I.S., Gibadullin R.F., Pystogov S.V., Raikhlin V.A. [Associative steganography of text mes-

sages]. *Vestnik moskovskogo universiteta. Serija 15: Vychislitel'naja matematika i kibernetika*, 2021, no. 1, pp. 3-14 (in Russ.).

20. Gibadullin R.F., Vershinin I.S., Volkova M.M. Software Development for Placing Tiles in Two-Dimensional Space. International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies - 2020 (FarEastCon 2020), p. 9271369.

### **Kinematics of Bennett Mechanism, Negative Angular Velocity**

*T.A. Mustafaev*, Post-graduate, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Republic of Tatarstan, Russia

*F.F. Khabibullin*, PhD in Engineering, Associate Professor, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Republic of Tatarstan, Russia

*M.R. Faizov*, Post-graduate, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Republic of Tatarstan, Russia

*This article provides reasoning and research of spatial mechanisms. The creation of the first simple Bennett mechanism obtained through the pyramid of its base and sides is described. In the pyramid, the angles of inclination and heights of the sides are determined to obtain standard equalities. Thanks to all the parameters, the theoretical link lengths that have practical values are determined. All parameters of length and angles are presented on the structural diagram for each received mechanism. On the basis of two identical, but mirrored mechanisms, a five-bar Bennett mechanism is synthesized. The five-link mechanism is obtained by mutual integration of two identical links, for which the calculation method is described. The article contains a calculation to determine the length and angle of the frame. The frame is obtained by the specified parameters of the ghost angle, the parameters of the two mirrored links derived into one expression. The specified inequality is used for a five-link mechanism in which it is obtained by a driving and a driven full-turn link. The text defines the main kinematic parameters of the links that make a complete turn around its axis without contact. All parameters of the mechanism are metered intuitively. Principle kinematic parameters of the mechanism: angular displacement, angular velocity and angular acceleration are determined. The kinematics is determined with respect to the driving and driven link, taking into account the angular displacement, speed and acceleration. For a more accurate calculation, the dependence of the additional ghost angle of the mechanism on the kinematic parameters is considered. The obtained data are visualized using diagrams of relationships of the rotation of the input link to the output using the Maple application. In trigonometric functions, there is a negative and a positive value determined by the quadrants on the sectors of the circle. Diagrams of angular displacement and angular velocity according to the calculations show negative numerical values. The angular acceleration of the driven link during the rotation of a full turn of the driving link of the mechanism changes its acceleration 4 times.*

*The analysis of the data obtained allows us to conclude that the driven link will rotate jerkily, at these moments there is a possibility of destruction of the mechanism and an increase in the load on the driven link and imbalance of the mechanism.*

**Keywords:** five-link mechanism, Bennett, ghost angle, double crank, driving crank, driven crank.

Получено 27.04.2022

#### **Образец цитирования**

Мустафаев Т. А., Ф. Ф. Хабибуллин, Фаизов М. Р. Кинематика 5R-механизма Беннетта, отрицательная угловая скорость // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2022. Т. 25, № 2. С. 34–39. DOI: 10.22213/2413-1172-2022-2-34-39.

#### **For Citation**

Mustafaev T.A., Khabibullin F.F., Faizov M.R. [Kinematics of Bennett Mechanism, Negative Angular Velocity]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2022, vol. 25, no. 2, pp. 34-39 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2022-2-34-39.